



⑳ Aktenzeichen: 196 23 172.8-52  
㉑ Anmeldetag: 10. 6. 96  
㉒ Offenlegungstag: —  
㉓ Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 23. 10. 97

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

㉔ Patentinhaber:

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 39106  
Magdeburg, DE; Michaelis, Bernd, Prof.  
Dr.-Ing.habil., 39175 Biederitz, DE

㉕ Erfinder:

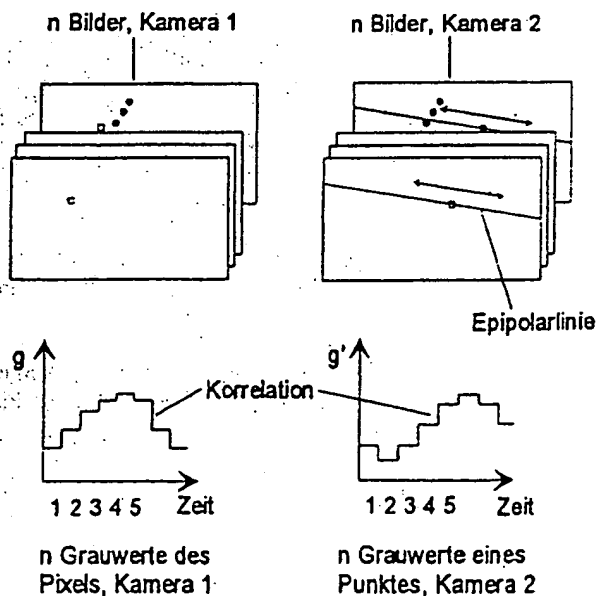
Michaelis, Bernd, Prof. Dr.-Ing. habil., 39175  
Biederitz, DE; Albrecht, Peter, Dipl.-Ing., 39104  
Magdeburg, DE

⑤⑥ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE 1 95 25 561 A1  
US 48 42 411

⑤④ Verfahren zur dreidimensionalen optischen Vermessung von Objektoberflächen

⑤⑦ Zur optischen 3-D-Vermessung von Oberflächen eignen sich Verfahren, die auf der Korrelation von Bildsegmenten (z. B. 11 x 11 Pixel) aus den Bildern zweier CCD-Kameras basieren. Durch diese Verfahren können Raumpunkte in der Regel mit relativ geringer statistischer Meßunsicherheit bestimmt werden. Die relativ große Korrelationsfläche (z. B. 11 x 11 Pixel) beeinträchtigt jedoch die örtliche Auflösung dieser bekannten Verfahren. Hieraus resultieren systematische Meßfehler bei der Vermessung von starken Krümmungen und Unstetigkeitsstellen.  
Beim erfindungsgemäßen Verfahren beträgt die Korrelationsfläche lediglich ein Pixel. Dies ist realisierbar, indem zunächst nacheinander n (z. B. 12) verschiedene Muster auf die Objektoberfläche projiziert und die entsprechende Anzahl von Bildpaaren aufgenommen werden. Somit liegt für ein ausgewähltes Pixel einer Kamera eine Folge von n Grauwerten vor. Zur Bestimmung des korrespondierenden Punktes wird der Korrelationskoeffizient zwischen dieser Grauwertfolge und der Grauwertfolge eines Punktes der anderen Kamera genutzt. Der Algorithmus basiert auf der Suche nach dem Korrelationsmaximum entlang der Epipolarlinie.



## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur dreidimensionalen optischen Vermessung von Objektoberflächen, bei dem Muster auf die Objektoberfläche projiziert und die Objektkoordinaten unter Anwendung einer Ähnlichkeitsanalyse der Grauwertverläufe in den von mindestens zwei Matrixkameras aufgenommenen Bildern der Objektoberfläche bestimmt werden.

Bekannte Verfahren zur dreidimensionalen optischen Objekt-Vermessung im Nahbereich sind z. B. photogrammetrische Verfahren oder Streifenprojektions-Verfahren. Während bei den Streifenprojektions-Verfahren auf das zu vermessende Objekt geometrisch möglichst exakt definierte, streifenförmige Muster projiziert werden, können bei der Photogrammetrie mehr oder weniger willkürliche Muster verwendet werden.

Der Projektor zur Projektion von Mustern auf die Objektoberfläche wird nachfolgend als Musterprojektor bezeichnet. Die Einrichtung zur Erzeugung eines Bildes der Objektoberfläche und der Sensor für die pixelweise Erfassung der Intensitätsverteilung in diesem Bild wird nachfolgend und insbesondere in den Ansprüchen zusammenfassend als Matrixkamera bezeichnet. Insofern werden unter die Bezeichnung Matrixkamera insbesondere CCD-Kameras und sonstige Anordnungen subsumiert, die geeignet sind, pixelweise eine Intensitätsverteilung zu erfassen. Unter einem Punkt im Subpixelbereich wird ein Ort auf dem Sensor verstanden, der zwischen den Pixelmittelpunkten liegt. Da man im allgemeinen davon ausgeht, daß die gemessenen Grauwerte nur für die Mittelpunkte der Pixel gelten, sollte der Grauwert für einen Punkt im Subpixelbereich aus den umliegenden Pixeln interpoliert werden. Hierfür eignet sich z. B. die bilineare Interpolation, bei der der Grauwert aus den 4 umliegenden Pixeln berechnet wird.

Zu einem ausgewählten Pixel des Sensors einer 1. Matrixkamera kann der nachfolgend als korrespondierender Punkt bezeichnete Ort auf dem Sensor einer 2. Matrixkamera so bestimmt werden, daß auf dem ausgewählten Pixel und dem korrespondierenden Punkt der gleiche Teil der Oberfläche des zu vermessenden Körpers abgebildet wird.

Bei Streifenprojektions-Verfahren besteht der Meßaufbau im einfachsten Fall aus einem Musterprojektor zur Projektion einer streifenförmigen Struktur, einer Matrixkamera (z. B. DE 39 38 714 A1) sowie dem zu vermessenden Objekt. Die Formen der auf die Oberfläche projizierten Streifen, die in determinierter Weise vom Objekt beeinflusst werden, werden vom Sensor erfaßt und können mittels eines nachgeschalteten Rechners ausgewertet werden.

Es ist auch bekannt, zwei Matrixkameras einzusetzen (z. B. US 4842411), um ein Bildpaar von der mit einem Musterprojektor statisch beleuchteten Objektoberfläche zu erzeugen. Auch bei dieser Variante werden die Objektkoordinaten unter Anwendung einer Ähnlichkeitsanalyse der Grauwertverläufe benachbarter Pixel bestimmt, die aus dem besagten Bildpaar stammen.

Aus der DE 195 25 561 A1 ist ein Verfahren zur dreidimensionalen optischen Vermessung von Objektoberflächen entnehmbar, bei dem Streifenmuster mit näherungsweise rechteckförmigen Hell-Dunkel-Übergängen auf die Oberfläche des Objekts projiziert und die Objektkoordinaten unter Anwendung einer Analyse der von zwei Matrixkameras aufgenommenen Bilder der Objektoberfläche bestimmt werden. Hierbei erzeugt jede Matrixkamera in an sich bekannter Weise einen Satz

von N zeitlich aufeinander folgenden Bildern, wobei zwischen den Bildaufnahmen die Streifenanzahl des Musters verändert wird. Die von den Matrixkameras aufgenommenen Bilder dienen zur Erzeugung von Raumcodewerten. Ziel ist es im wesentlichen, charakteristische Größen (z. B. Ecken) geometrischer Gebilde zu bestimmen, vorzugsweise von Objekten mit ebenen Oberseiten. Hierzu werden die dreidimensionalen Koordinaten eines Punktes durch den entsprechenden Raumcodewert und die Ebenengleichung der Oberseite des zu vermessenden Körpers bestimmt.

Ein spezielles Streifenprojektions-Verfahren ist das Phasenschiebeverfahren, das relativ hohe Genauigkeiten der gemessenen 3D-Koordinaten gewährleistet. Wesentliche Aufgaben bei der Auswertung der von den Matrixkameras erfaßten Intensitätsverteilungen bestehen darin, die absolute Ordnung der einzelnen Streifen sowie für jeden Bildpunkt die Phasenlage zu bestimmen.

Für letzteres werden von der Objektoberfläche zeitlich nacheinander  $N \geq 3$  Einzelaufnahmen erzeugt, wobei das auf die Oberfläche projizierte, periodische Streifenmuster zwischen den Aufnahmen um jeweils den n-ten Teil der Streifenperiode verschoben wird. Somit wird für jeden Bildpunkt ein Satz von N Einzelaufnahmen erhalten.

Ein genereller Nachteil der Koordinatenmessung nach dem Phasenschiebe-Verfahren besteht in der Notwendigkeit, den Musterprojektor zu kalibrieren. Dies resultiert aus dem Prinzip, die 3D-Koordinaten mit Hilfe der Matrixkamera und des Projektors (i. allg. durch Triangulation) zu bestimmen. Damit wird dem Projektor eine Funktion übertragen, die normalerweise von einer Kamera übernommen wird. Die Kalibrierung des Projektors ist im allgemeinen schwieriger durchzuführen als eine Kamerakalibrierung. Des weiteren sind die Verzerrungsparameter meist größer und lassen sich nicht so exakt bestimmen wie bei einer Matrixkamera. Dies kann eine größere Unsicherheit bei der Berechnung der Raumkoordinaten verursachen.

Ein weiteres Problem ergibt sich daraus, daß der Grauwertverlauf der Streifen oft nicht ideal sinusförmig ist. Diese Abweichungen können direkt das Meßergebnis verfälschen und führen damit zu einer geringeren Meßgenauigkeit.

Bei photogrammetrischen Verfahren basiert die Berechnung der Koordinaten der Objektoberfläche auf den von mindestens zwei Kameras erzeugten Bildern der Objektoberfläche.

Ein Vorteil der Photogrammetrie ist die hohe Meßgenauigkeit. Kritisch wird die Vermessung jedoch im Bereich starker Krümmungen oder bei Unstetigkeiten der Objektoberfläche, weil die Lagebestimmung korrespondierender Bildpunkte üblicherweise über eine Ähnlichkeitsanalyse der Grauwertverläufe in zwei Kamerabilddern innerhalb einer definierten Meßfläche mit einer Größe von einigen Pixeln (z. B.  $15 \times 15$ ) erfolgt. Als Maß für die Ähnlichkeit wird üblicherweise das Maximum der Korrelationsfunktion oder das Minimum der Summe der Fehlerquadrate dieser beiden Grauwertverläufe verwendet.

Die Meßgenauigkeit dieses Verfahrens ist daher stark von der Größe der Meßfläche abhängig. Kritische Oberflächen, d. h. Oberflächen mit starken Krümmungen oder Unstetigkeiten verursachen daher systematische Meßfehler. Um diesen Nachteil abzuschwächen, könnte die Größe der Meßfläche verkleinert werden. Damit würde jedoch die für die Ähnlichkeitsanalyse der Grauwertverläufe verwendete Pixelfanzahl und damit

ner Ähnlichkeitsanalyse dieser Grauwertfolgen die Lage korrespondierender Punkte auf den Kamerasensoren bestimmt wird, aus denen sich durch Triangulation die Raumkoordinaten des zugeordneten Punktes der Objektoberfläche ergibt.

Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht darin, daß die Projektor-Parameter nicht in die eigentliche Berechnung der 3D-Koordinaten durch Triangulation eingehen. Somit wird eine aufwendige Kalibrierung des Musterprojektors vermieden.

Vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung und deren Vorteile ergeben sich unmittelbar aus den Unteransprüchen.

Eine besonders vorteilhafte Ausführungsform der Erfindung betrifft die Ausgestaltung der projizierten Muster. Als effektiv haben sich Streifenmuster mit einer Orientierung erwiesen, bei der die Längsrichtung der auf die Sensorebenen der Matrixkameras abgebildeten Streifen annähernd senkrecht zu den Epipolarlinien verläuft. Dadurch werden günstige Grauwertgradienten und somit ein hoher Informationsgehalt entlang dieser Linien erhalten. Dies wirkt sich günstig auf die Genauigkeit der Ortsbestimmung der korrespondierenden Punkte aus.

Die Grauwerte quer zur Linienrichtung sollten möglichst im gesamten zu vermessenden Bereich Änderungen aufweisen. Hierfür bietet sich z. B. ein möglichst sinusförmiger Grauwertverlauf an. Die notwendigen N unterschiedlichen Intensitätsverteilungen auf der zu vermessenden Objektoberfläche können in unterschiedlicher Weise erzeugt werden. Nach einer ersten Variante wird das Streifenmuster zwischen den Bildaufnahmen jeweils um einen Bruchteil seiner Periode verschoben. Bei einer weiteren Variante werden die unterschiedlichen Intensitätsverteilungen durch Projektion von Streifenmustern mit unterschiedlicher Periode oder durch eine Kombination beider Varianten erzeugt.

Bei einer anderen vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung weisen die projizierten Muster eine stochastische Struktur auf. Die zeitlich aufeinanderfolgenden unterschiedlichen Intensitätsverteilungen auf der Objektoberfläche werden in diesem Fall durch Translation und/oder Rotation des projizierten Musters oder durch Änderung der Struktur des Musters erzeugt.

Die erfindungsgemäße Lösung wird einschließlich ihrer Funktionsweise nachstehend anhand eines Ausführungsbeispiels, das von einem Meßaufbau mit einem Projektor und zwei Matrixkameras ausgeht, näher erläutert. Mit Rücksicht auf die Übersichtlichkeit wird auf die Darstellung des erfindungsgemäßen Verfahrens für Pixel- bzw. Punktmengen sowie mehr als zwei Matrixkamera verzichtet. Es wird daher nur der Sonderfall betrachtet, bei dem jeweils zu einem einzelnen vorgegebenen Punkt auf einer 1. Matrixkamera der korrespondierende Punkt auf einer 2. Matrixkamera ermittelt wird. In der zugehörigen Zeichnung zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung zur Veranschaulichung der im Zeitbereich erzeugten Grauwertfolgen und der Bestimmung eines korrespondierenden Punktes;

Fig. 2a eine auf den Sensor der Matrixkamera 1 projizierte helle Linie mit einem ausgewählten Pixel;

Fig. 2b eine auf den Sensor der Matrixkamera 2 projizierte helle Linie mit Epipolarlinie und näherungsweise korrespondierendem Punkt zu einem ausgewählten Pixel des Sensors der Matrixkamera 1;

Fig. 3a ein Schema zur Lagebestimmung neuer Meßpunkte auf der Epipolarlinie der Matrixkamera,

Fig. 3b ein Schema zur Lagebestimmung neuer näherungsweise korrespondierender Punkte auf der Epipolarlinie der Matrixkamera 2.

Im oberen Teil der Fig. 1 sind N Ebenen perspektivisch dargestellt, die N Bilder mit N unterschiedlichen Intensitätsverteilungen veranschaulichen sollen, die in vorgebbaren Zeitabständen auf den Sensoren der Matrixkamera 1 und 2 erzeugt werden.

In den der Matrixkamera 1 zugeordneten Ebenen ist weiterhin ein willkürlich ausgewählter Sensorpunkt eingetragen. Der lagemäßig diesem Punkt entsprechende Sensorpunkt der Matrixkamera 2 (korrespondierender Punkt) und die Epipolarlinie für die Matrixkamera 2, die bezüglich des auf der Kamera 1 ausgewählten Sensorpunktes definiert ist, sind in den der Matrixkamera 2 zugeordneten Ebenen im rechten oberen Teil der Fig. 1 dargestellt.

Im unteren Teil der Fig. 1 sind die Werte der für die genannten Punkte ermittelten Grauwerte über die Zeit aufgetragen, um die für jede Matrixkamera getrennt einem Punkt zuzuordnende Grauwertfolge zu veranschaulichen.

Näherungsweise korrespondierende Punkte als Startwerte der Messungen können mit verschiedenen Varianten ermittelt werden. So kann z. B. ein weiteres Bildpaar aufgenommen werden, bei dem gem. Fig. 2a auf das Meßobjekt lediglich eine helle Linie projiziert wird.

Aus Gründen der besseren Meßgenauigkeit sollte die Abbildungen dieser Linie auf die Kamerasensoren etwa senkrecht zu den Epipolarlinien verlaufen, wie in Fig. 2b erkennbar ist. Ausgehend von dieser hellen Linie können unter Verwendung von Epipolarlinien sehr einfach näherungsweise korrespondierende Punktepaare bestimmt werden:

Zunächst wird eines der Pixel der Matrixkamera 1 ausgewählt (P1 in Fig. 2a), auf denen die Linie abgebildet wird. Für das Pixel P1 kann nun in an sich bekannter Weise die Epipolarlinie auf dem Sensor der Matrixkamera 2 berechnet werden. Diese Linie wird punktwise abgetastet, wobei der Abstand zwischen den Abtastpunkten etwa ein Pixel betragen sollte. Der Punkt mit dem hellsten Grauwert ist ein näherungsweise korrespondierender Punkt P2 (Näherung) (Fig. 2b) zu dem ausgewählten Pixel P1 der Matrixkamera 1.

Ausgehend von diesem näherungsweise korrespondierenden Punkt P2 (Näherung) erfolgt die Bestimmung besserer Näherungswerte für den zu P1 korrespondierenden Punkt entsprechend dem erfindungsgemäßen Verfahren. Ein derart ermitteltes exakt korrespondierendes Punktepaar kann nun dazu verwendet werden, ein neues näherungsweise korrespondierendes Punktepaar P1neu und P2neu auf der für Kamera 1 und Kamera 2 definierten Epipolarlinie (Fig. 3a und Fig. 3b) zu berechnen: Der Abstand zwischen dem Punkt P1alt und P1neu auf der Epipolarlinie 1 ist ein festgelegter Betrag x (Fig. 3a), der aus der gewünschten Meßpunktdichte resultiert, die z. B. ein bis wenige Pixel beträgt. Aus diesem Betrag x wird der Abstand zwischen neuem und altem Punkt (P2alt und P2neu) auf der Epipolarlinie 2 (Fig. 3b) durch Multiplikation mit einem Streckungsfaktor k berechnet. Die Verwendung eines solchen Faktors ist notwendig, da die Streifen unterschiedlich dicht in beiden Kameras abgebildet werden können.

Zur Berechnung des Faktors k werden zunächst zu beiden Seiten des Punktes P1alt auf der Epipolarlinie 1 weitere Punkte mit gleichmäßigen Abständen (etwa ein Pixel) festgelegt, denen aus einem der aufgenommenen Bilder der Matrixkamera 1 die Grauwerte zugeordnet

die Genauigkeit der mittels Ähnlichkeitsanalyse bestimmten Lage der korrespondierenden Punkten reduziert. Insofern erscheint dieser Lösungsansatz nur bedingt geeignet.

Der Erfindung liegt daher folgende Aufgabe zugrunde: Bei einem Verfahren zur dreidimensionalen optischen Vermessung von Objektoberflächen, bei dem Muster auf die Objektoberfläche projiziert und die Objektkoordinaten unter Anwendung einer Ähnlichkeitsanalyse der Grauwertverläufe in den von mindestens zwei Matrixkameras aufgenommenen Bildern der Objektoberfläche bestimmt werden, soll der Meßfehler bei kritischen Oberflächen durch eine Verkleinerung der die Größe der Meßfläche bestimmenden Pixelanzahl wesentlich verringert werden. Zugleich soll jedoch erreicht werden, daß eine Abnahme der Genauigkeit der Ähnlichkeitsanalyse der Grauwertverläufe, die wegen der nunmehr in die Auswertung eingehenden kleineren Pixelanzahl unvermeidlich erscheint, in vorgebbaren Grenzen gehalten oder nahezu vollständig vermieden wird. In Zusammenhang mit diesen Maßnahmen zur Reduzierung des Meßfehlers soll zugleich erreicht werden, daß auf eine Kalibrierung des Musterprojektors verzichtet werden kann.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe durch ein Verfahren gemäß dem Kennzeichen des 1. Anspruchs gelöst.

Die Funktionsweise des erfindungsgemäßen Meßverfahrens, das mit einem Meßaufbau realisiert wird, der aus mindestens zwei Matrixkameras und einem Musterprojektor sowie dem zu vermessenden Körper besteht, läßt sich wie folgt charakterisieren.

In vorgebbaren Zeitabständen wird  $n$ -mal nacheinander auf die Oberfläche des zu vermessenden Körpers ein Muster derart projiziert, daß auf der Körperoberfläche temporär  $N$  unterschiedliche Intensitätsverteilungen erzeugt werden. Jedem Punkt des zu vermessenden Oberflächenbereiches läßt sich daher eine Folge von  $N$  temporären Intensitätswerten zuordnen. Die Musterstruktur und die Art und Weise der Projektion soll zweckmäßigerweise der Bedingung genügen, daß in jedem Punkt der zu vermessenden Körperoberfläche möglichst hohe Gradienten in der Folge der  $N$  Intensitätswerte auftreten.

Jede der so erzeugten temporären Intensitätsverteilungen wird mit mindestens  $k \geq 2$  Matrixkameras erfaßt. Für jede Matrixkamera werden dann pixelweise die Grauwerte in den so erzeugten  $N$  Bildern bestimmt. Für jeden Pixel jeder Matrixkamera wird daher eine aus  $N$  Elementen bestehende Grauwertfolge erhalten. Jede so ermittelte Grauwertfolge kann als eine im Zeitbereich erzeugte Grauwertfolge aufgefaßt werden, da sie aus der Folge von  $N$  temporären Intensitätswerten an dem Punkt des zu vermessenden Oberflächenbereiches resultiert, der in den betreffenden Pixel abgebildet wird.

Nach Erhalt der Grauwertfolgen wird die Bestimmung einer 3D-Koordinate mit der Festlegung eines Pixels  $P_1$  oder einer aus einigen benachbarten Pixeln bestehenden Pixelmenge auf dem Sensor einer 1. Matrixkamera und der Zuordnung der nach dem oben beschriebenen Verfahren im Zeitbereich erzeugte Grauwertfolgen zu diesen Pixeln fortgesetzt.

Die zum Pixel  $P_1$  bzw. zur Pixelmenge korrespondierenden Punkte auf den Sensoren der anderen Matrixkameras werden bestimmt, indem die Ähnlichkeit der den Pixeln in den Bildern der  $k$  Matrixkameras zugeordneten Grauwertfolgen mit an sich bekannten Methoden, z. B. Korrelationsverfahren, Fehlersummenverfahren

u. a., ermittelt wird.

Durch Verwendung des Kreuzkorrelationskoeffizienten als eines der möglichen Ähnlichkeitskriterien können die zum Pixel  $P_1$  bzw. zur Pixelmenge  $P_m$  korrespondierenden Punkt auf den Sensoren der anderen Matrixkameras mit Subpixelgenauigkeit gefunden werden.

Die Suche nach den korrespondierenden Punkt kann auf die Epipolarlinie unter Berücksichtigung der Verzerrung beschränkt werden. Ausgangspunkt der Messung ist ein näherungsweise korrespondierender Punkt auf der Epipolarlinie bzw. bei Verwendung einer Pixelmenge eine näherungsweise korrespondierende Punktmenge. Der näherungsweise korrespondierende Punkt bzw. die Punktmenge ist maximal wenige Pixel vom exakten Ort des korrespondierenden Punktes bzw. der Punktmenge entfernt. Den näherungsweise korrespondierenden Punkten bzw. Punktmenge können ebenfalls Grauwertfolgen zugeordnet werden. Anschließend wird der Korrelationskoeffizient zwischen den Grauwertfolgen berechnet werden, die dem Pixel  $P_1$  bzw. der Pixelmenge  $P_m$  der 1. Matrixkamera und den näherungsweise korrespondierenden Punkten bzw. Punktmenge der anderen Matrixkamera zugeordnet sind.

Eine Verschiebung der näherungsweise korrespondierenden Punkte auf der Epipolarlinie der Matrixkameras bewirkt eine Veränderung des Korrelationskoeffizienten zwischen den Grauwertfolgen. Hierdurch ist es möglich, den Anstieg der Korrelationsfunktion zu bestimmen. Aus der Kenntnis dieses Anstieges können Punkte berechnet werden, die näher an dem gesuchten korrespondierenden Punkt bzw. der gesuchten korrespondierenden Punktmenge liegen. Auf diese Weise ist es iterativ möglich, den Punkt bzw. die Punktmenge zu finden, wo der Korrelationskoeffizient zwischen den Grauwertfolgen ein Maximum annimmt. Es kann nun davon ausgegangen werden, daß dieser Punkt bzw. diese Punktmenge mit hoher Genauigkeit mit dem gesuchten korrespondierenden Punkt bzw. der gesuchten korrespondierenden Punktmenge übereinstimmt.

Nachdem diese Prozedur für weitere Pixel auf dem Sensor der 1. Matrixkamera wiederholt ist, werden die Raumkoordinaten von Punkten der Objektoberfläche durch Triangulation aus den Orten der vorgegebenen Pixel bzw. Pixelmengen und der zu ihnen korrespondierenden Punkte bzw. Punktmenge auf den anderen Kamerasensoren bestimmt.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahrensweisen in der Photogrammetrie werden bei der Erfindung  $N$  Grauwerte je Pixel verwendet. Dies ermöglicht es, die Anzahl der Pixel und damit die Meßfläche, für die ein Ähnlichkeitsvergleich der Grauwerte unterschiedlicher Matrixkameras erfolgt, auf ein Pixel bzw. auf eine geringe Anzahl benachbarter Pixel zu reduzieren, wodurch eine deutliche Erhöhung der örtlichen Auflösung möglich ist und bei kritischen Oberflächen der Meßfehler verringert wird. Hierbei ist ein Kompromiß zwischen der Größe der Meßfläche und der Bildanzahl  $N$  zu finden. So könnten z. B.  $2 \times 2$  Pixeln aus den  $N$  Bildern die Grauwerte zugewiesen werden, so daß  $4n$  Grauwerte als Grundlage des Ähnlichkeitsvergleichs genutzt werden. Die Bestimmung der korrespondierenden  $2 \times 2$  Pixel der anderen Kamera erfolgt unter Verwendung der entsprechenden Epipolarlinien.

Der wesentliche Unterschied zu den bekannten Phasenschiebungsverfahren besteht darin, daß aus den Grauwertfolgen, die den Pixeln zugeordnet werden, keine Phasenwerte berechnet werden, sondern daß mittels ei-

den Wert 0 annehmen

# Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

Die Aufgabe besteht aus 10 Teilaufgaben, die jeweils eine Zeichnung und eine Beschreibung enthalten. Die Zeichnungen sind in der Regel schematische Darstellungen von Bauteilen oder Maschinen. Die Beschreibungen geben Hinweise auf die Funktion und die Konstruktion der Bauteile.

Die Aufgaben sind wie folgt gegliedert:

1. Aufgabe: Zeichnung eines Bauteils mit einer Beschreibung.
2. Aufgabe: Zeichnung eines Bauteils mit einer Beschreibung.
3. Aufgabe: Zeichnung eines Bauteils mit einer Beschreibung.
4. Aufgabe: Zeichnung eines Bauteils mit einer Beschreibung.
5. Aufgabe: Zeichnung eines Bauteils mit einer Beschreibung.
6. Aufgabe: Zeichnung eines Bauteils mit einer Beschreibung.
7. Aufgabe: Zeichnung eines Bauteils mit einer Beschreibung.
8. Aufgabe: Zeichnung eines Bauteils mit einer Beschreibung.
9. Aufgabe: Zeichnung eines Bauteils mit einer Beschreibung.
10. Aufgabe: Zeichnung eines Bauteils mit einer Beschreibung.

Die Zeichnungen sind in der Regel in der Draufsicht oder in der Seitenansicht dargestellt. Die Beschreibungen sind in der Regel in der ersten Person Singular formuliert.

Die Aufgaben sind wie folgt gegliedert:

1. Aufgabe: Zeichnung eines Bauteils mit einer Beschreibung.
2. Aufgabe: Zeichnung eines Bauteils mit einer Beschreibung.
3. Aufgabe: Zeichnung eines Bauteils mit einer Beschreibung.
4. Aufgabe: Zeichnung eines Bauteils mit einer Beschreibung.
5. Aufgabe: Zeichnung eines Bauteils mit einer Beschreibung.
6. Aufgabe: Zeichnung eines Bauteils mit einer Beschreibung.
7. Aufgabe: Zeichnung eines Bauteils mit einer Beschreibung.
8. Aufgabe: Zeichnung eines Bauteils mit einer Beschreibung.
9. Aufgabe: Zeichnung eines Bauteils mit einer Beschreibung.
10. Aufgabe: Zeichnung eines Bauteils mit einer Beschreibung.

Die Zeichnungen sind in der Regel in der Draufsicht oder in der Seitenansicht dargestellt. Die Beschreibungen sind in der Regel in der ersten Person Singular formuliert.

werden. Auf der Epipolarlinie 2 werden in analoger Weise Punkte festgelegt sowie die Grauwerte aus dem passenden Bild der Matrixkamera 2 bestimmt. Das für diese Berechnungen ausgewählte Bildpaar kann ein beliebiges der Bildsequenz sein, jedoch nicht das mit dem einzelnen hellen Streifen.

Eine Variation bzw. Streckung der Abstände zwischen den Punkten der Kamera 2 verursacht eine Änderung des Korrelationskoeffizienten zwischen den entsprechenden Grauwerten der beiden Kameras. Mit Hilfe eines Gradientenanstiegsverfahrens ist es möglich, den gesuchten Streckungsfaktor  $k$  zu ermitteln, der eine maximale Korrelation der Grauwerte bewirkt. Dieser Faktor  $k$  wird verwendet zur Berechnung des Abstandes zwischen altem und neuem Punkt ( $P_{2alt}$  und  $P_{2neu}$ ) der Matrixkamera 2 aus dem festgelegten Abstand  $x$  der Matrixkamera 1.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur dreidimensionalen-optischen Vermessung von Objektoberflächen, bei dem Muster auf die Objektoberfläche projiziert und die Objektkoordinaten unter Anwendung einer Ähnlichkeitsanalyse der Grauwertverläufe in den von mindestens zwei Matrixkameras aufgenommenen Bildern der Objektoberfläche bestimmt werden, dadurch gekennzeichnet, daß

a) jede der Matrixkameras in an sich bekannter Weise einen Satz von  $N$  zeitlich aufeinanderfolgenden Bildern erzeugt, wobei zwischen den Bildaufnahmen das projizierte Muster um vorgegebene Werte verschoben und/oder gedreht und/oder die Struktur des Musters verändert wird,

b) mindestens ein Pixel bzw. ein Punkt im Subpixelbereich einer 1. Matrixkamera ausgewählt wird, für diese Pixel- bzw. Punktmenge die Grauwerte in den  $N$  Bildern dieser Matrixkamera ausgelesen bzw. durch Subpixelinterpolation bestimmt und diese im Zeitbereich definierten Grauwertfolgen dieser Pixel- bzw. Punktmenge zugewiesen werden,

c) zu der ausgewählten Pixel- bzw. Punktmenge der 1. Matrixkamera in an sich bekannter Weise die Epipolarlinien auf mindestens einer weiteren Matrixkamera ermittelt werden,

d) auf mindestens einer der im vorhergehenden Schritt bestimmten Epipolarlinien in an sich bekannter Weise eine 1. näherungsweise korrespondierende Punktmenge bestimmt wird,

e) mindestens eine weitere Punktmenge mit gleicher Anzahl von Punkten auf der bzw. den Epipolarlinien in der Nähe der aus dem Schritt d) resultierenden Punktmenge bestimmt wird,

f) den aus den Schritten d) und e) resultierenden Punktmenge die durch Subpixelinterpolation aus bis zu  $N$  Bildern bestimmten Grauwertfolgen zugewiesen werden und die Ähnlichkeitsmaße zwischen den so bestimmten Mengen von Grauwertfolgen und der aus dem Schritt b) resultierenden Menge von Grauwertfolgen bestimmt werden,

g) sofern das vorgegebene Abbruchkriterium erreicht ist, mit Schritt h) fortgefahren wird und sofern das vorgegebene Abbruchkriterium nicht erreicht ist, solange die zuletzt be-

stimmten Ähnlichkeitsmaße für die Bestimmung neuer näherungsweise korrespondierender Punktmenge benutzt werden und dann wieder die Ähnlichkeitsmaße zwischen den Mengen von Grauwertfolgen, die den neuen näherungsweise korrespondierenden Punktmenge zugeordnet sind, und der aus dem Schritt b) resultierenden Menge von Grauwertfolgen bestimmt werden bis das vorgegebene Abbruchkriterium erreicht ist,

h) die gesuchten Raumkoordinaten in an sich bekannter Weise aus den korrespondierenden Punktmenge der Matrixkameras berechnet werden,

i) die Schritte b) bis h) solange wiederholt werden, bis für eine vorgegebene Anzahl von ausgewählten Pixeln bzw. Punkten im Subpixelbereich der 1. Matrixkamera 3D-Koordinaten der Oberfläche vorliegen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Orte mindestens zweier näherungsweise korrespondierender Punktmenge um den Betrag der bekannten Verzerrung korrigiert werden, bevor den lagekorrigierten Punkten die durch Subpixelinterpolation aus bis zu  $N$  Bildern bestimmten Grauwertfolgen zugewiesen werden.

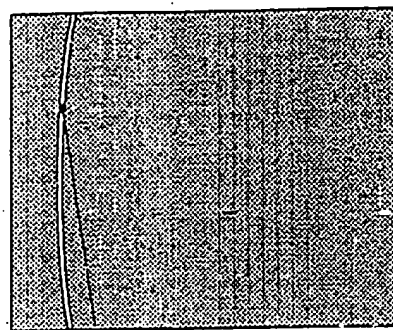
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die projizierten Muster eine periodische streifenförmige Struktur aufweisen, die etwa senkrecht zu den Epipolarlinien verläuft, und sich die zeitlich aufeinanderfolgenden Muster dadurch unterscheiden, daß die Streifen jeweils um einen Bruchteil ihrer Periode verschoben werden.

4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die projizierten Muster eine stochastische Struktur aufweisen und sich die zeitlich aufeinanderfolgenden Muster dadurch unterscheiden, daß sie um einen vorgegebenen Betrag verschoben oder verdreht werden.

5. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die projizierten Muster eine stochastische Struktur aufweisen und sich die zeitlich aufeinanderfolgenden Muster dadurch unterscheiden, daß sie eine voneinander unterschiedliche Struktur aufweisen.

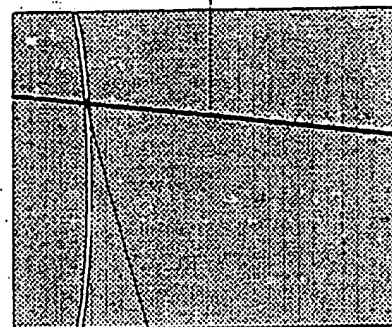
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß nach Erzeugung eines Satzes von  $N$  zeitlich aufeinanderfolgenden Bildern mehrere benachbarte Pixel bzw. Punkte im Subpixelbereich mit ungefähr Pixelabstand auf einer 1. Matrixkamera ausgewählt werden, für diese Pixel- bzw. Punktmenge die Grauwerte in den  $N$  Bildern dieser Matrixkamera ausgelesen bzw. durch Subpixelinterpolation bestimmt und diese im Zeitbereich definierten Grauwertfolgen dieser Pixel- bzw. Punktmenge zugewiesen werden und der weitere Verfahrensablauf nach Bestimmung einer entsprechenden Anzahl korrespondierender benachbarter Punkte mindestens einer weiteren Matrixkamera analog zu dem für den Fall der Auswahl eines Pixels auf einer 1. Matrixkamera geltenden Ablauf fortgesetzt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß eine Menge von  $K \times M$  Pixeln bzw. Punkten im Subpixelbereich verwendet werden, wobei  $k$  und  $m$  ganze Zahlen im Bereich von 0 bis 7 sind, deren Wert unabhängig voneinander in der Weise vorgebar ist, daß  $K$  und  $M$  nicht gleichzei-



P1

Fig. 2a



P2 (Näherung)

Fig. 2b

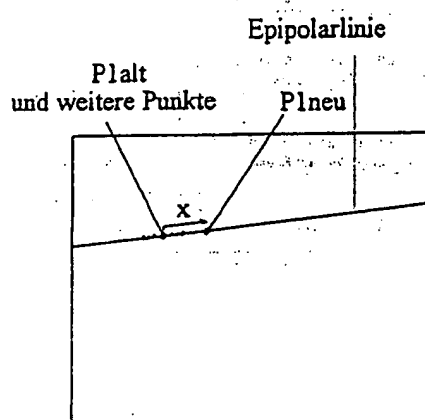
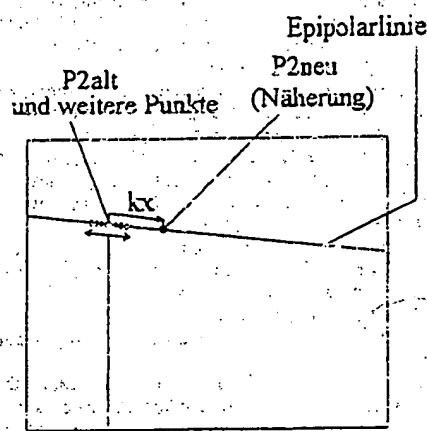


Fig. 3a



Veränderung des Korrelationskoeffizienten  
durch Variation des Streckungsfaktors  $k$

Fig. 3b



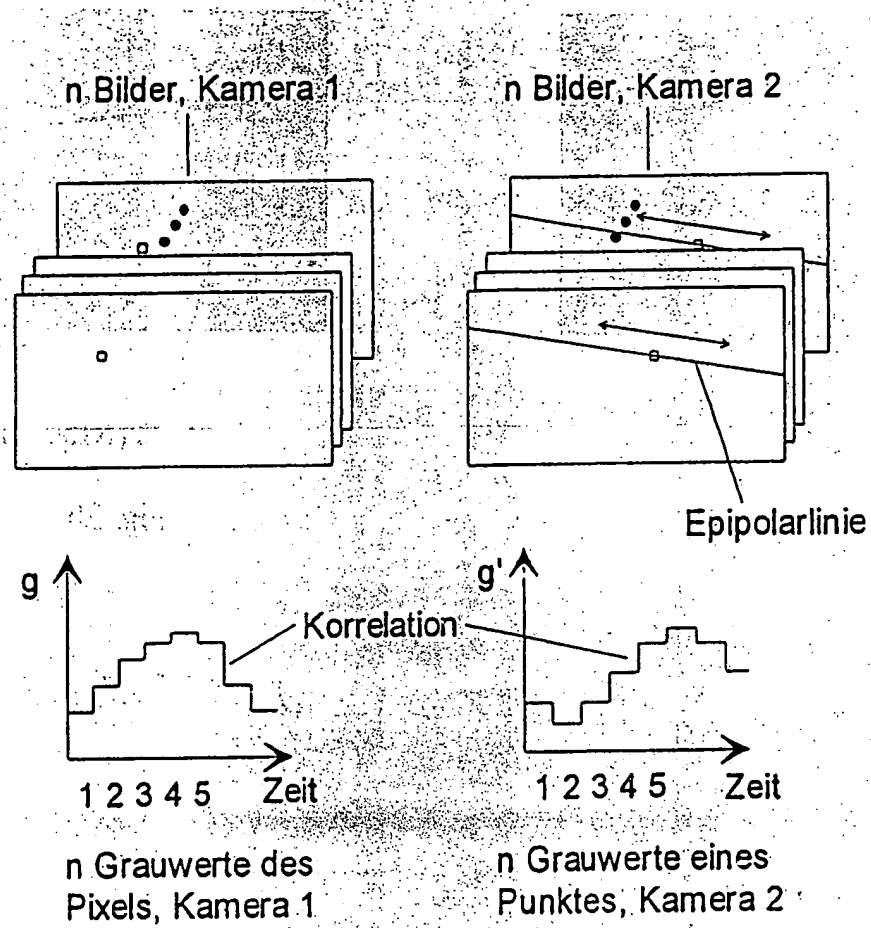


Fig. 1